

where: $h(l)$ – current height of a profile, %; 69.7 – coefficient determining the position of the mass center system “Height – Length – Shape slope”; 0.434 and 0.033 – factors that determine the shape and incline of the curve; l – the width of the profile section, %; t – the period of normalized time.

At that, digital models of status and dynamics of relief in connection with the geocoded information, and the space images of the studied surface of allow to determine the spatial disposition, shape and topology of geoeosystems. Modeling of landscapes is the basis for identifying the existing erosion relief, as it reflects already established, for some time, situation, as well as when identifying stable relationships allows predicting the erosion state of such landscapes.

Keywords: digital model, geoeosystem, the Volga Upland.

doi:10.15356/0435-4281-2016-3-36-45

УДК 551.438.5(470.323)

© 2016 г. С.В. ХАРЧЕНКО

ОПЫТ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА НА АЭРАЦИЮ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

*ФГАОУ ВО “Казанский федеральный университет”, Казань, Россия
e-mail: xar4enkkoff@rambler.ru*

Аэрационные свойства застройки являются одной из важных характеристик городской среды. Для количественной оценки влияния, которое оказывает рельеф земной поверхности на аэрацию кварталов застройки, используется технология CFD (вычислительной гидрогазодинамики, computation fluid dynamics), реализованная в программе UrbaWind. Необходимый этап CFD-моделирования – построение геометрически корректного отображения реальной местности, включающего в себя топографическую поверхность, застройку, крупные скопления древесной растительности. Вводные данные для CFD-моделирования требуют применения цифровых моделей рельефа и застройки и полевых ветромерных измерений (для верификации компьютерной модели). Результаты моделирования обрабатываются при помощи методов математической статистики. Проведена оценка влияния рельефа на аэрацию двух участков жилой застройки в г. Курск: группа разноэтажных кварталов к северу от исторического центра г. Курска, включая фрагмент долины р. Кур; и участок на подсыпанном фрагменте поймы р. Тускарь, который ранее принадлежал т. н. “Ямской слободе”. Влияние рельефа на аэрацию кварталов городской застройки можно количественно выразить путем сравнения вычисленных параметров ветрового потока по разным направлениям – для условий идеальной плоской поверхности и для реального рельефа. Это сравнение удобно проводить с использованием коэффициента R парной корреляции Пирсона для параметров ветра в соответствующих узлах расчетной сетки для двух “обстановок рельефа”. На территориях, взятых в качестве примеров, минимальные показатели R характерны для более расчлененной поверхности первого участка и соответствуют, во-первых, генеральному направлению уклона всего участка, во-вторых, направлению уклона наиболее крутосклонной площадки – циркообразного фрагмента эрозионного уступа долины р. Кур. Морфология земной поверхности даже в условиях равнин оказывает весьма существенное влияние на аэрацию территории.

Ключевые слова: рельеф городской территории, аэрация жилой застройки, оценка, CFD-моделирование.

Введение

Роль рельефа как фактора ветровой обстановки вплоть до недавнего времени изучалась, прежде всего, для проектирования отдельных ветроэнергетических установок и их систем [1–4]. В последние годы все более популярным (по ряду причин) становится анализ влияния рельефа, в том числе архитектурного, на аэрацию городских кварталов [5, 6]. Для высокой линейной вытянутой группы зданий с “понижением” улицы между ними был введен даже специальный термин – “уличный каньон” (street canyon) или, реже, “городской каньон” (urban canyon – понятие впервые определено, по-видимому, в [7, 8]). В этих терминах трудно не заметить аналогий с геоморфологической категорией – каньон.

Основание аналогии лежит в морфологическом сходстве узких и глубоко врезанных речных долин, с одной стороны, и улиц – с другой. Однако роль собственно земной поверхности в формировании ветровой обстановки, а не поверхности строений, чаще всего игнорируется.

В отдельных работах [9] отмечается, что влиянием условно естественного (насколько он может быть “естественным” в городах) рельефа в соотношении с “рельефом” застройки можно пренебречь в большинстве случаев для городов на равнинах. Говорится, что влияние рельефа на ветровые потоки становится достаточно значимым, когда амплитуда высот земной поверхности в некоторой окрестности (в какой – не конкретизируется) двукратно превышает высоту застройки [10]. И даже в этих случаях используемый подход обычно заключается в расчленении поверхности на участки с разной экспозицией, крутизной и относительным гипсометрическим положением (плакор; верхняя, средняя или нижняя часть склона; днище той или иной полой формы) [11, 12]. Такие приемы использовались, насколько нам известно, еще в 20-х гг. XX в. при зонировании некоторых городов восточного побережья США, например [13], а возможно – и раньше. Используются они и сейчас в силу своей дешевизны и простоты, но в ущерб точности получаемых результатов.

В период с середины последнего десятилетия XX в. возникли и получили широкое развитие в науках о Земле методы “вычислительной газогидродинамики” (computation fluid dynamics, CFD), которыми хорошо описываются процессы течения воды или движения воздуха. Среди основных недостатков этой группы методов – дороговизна программного обеспечения (вкпе с почти полным отсутствием свободно распространяемых CFD-программ) и огромная ресурсоемкость моделирования. Однако эти недостатки во многом компенсируются достигаемой точностью результатов, сопоставимой с точностью еще более дорогого натурального эксперимента в аэродинамической трубе.

Этой работой автор стремится решить две тесно связанные проблемы. Во-первых, предложить конкретный метод оценки влияния рельефа на аэрацию городских кварталов. Аэрационные свойства застройки, бесспорно, являются одной из важных характеристик среды жизни. Анализ рельефа как фактора аэрации в перспективе может стать одним из пунктов комплексного эколого-геоморфологического обследования городских территорий. Тем более, что работы, в которых ставятся аналогичные цели, постепенно появляются в научной печати [14, 15 и др.]. Во-вторых, показать, что роль рельефа в формировании той или иной ветровой обстановки даже в равнинном городе оказывается значительной и, следовательно, требует учета.

Материалы и методы

Необходимым этапом CFD-моделирования является построение геометрически корректного отображения реальной местности. Собственно 3D-“геометрия” должна включать в себя топографическую поверхность, застройку, крупные скопления древесной растительности. Информация о рельефе извлекается из общедоступных цифровых моделей (например, SRTM), оцифрованных топографических карт и планов, данных аэрокосмической съемки и пр. Сведения о плановых очертаниях застройки берутся из открытых карт, ее высотные характеристики присваиваются по полевым материалам. Космические снимки позволяют получить информацию об очертаниях массивов растительности, однако их средние высотные характеристики, а также параметры густоты (или, вернее, “пористости”) массива могут быть получены в полевых условиях, либо взяты с топографических планов. Важной вводной информацией служат сведения о характере шероховатости подстилающей поверхности для входного ветрового потока (это высотный уровень над поверхностью грунта, на котором “средняя скорость ветра обращается в нуль; ниже этого уровня имеют место только турбулентные пульсации” [16, с. 187]). В используемой нами программе UrbaWind этот параметр выбирается из

четырёх типовых значений: для водной глади, “открытой местности”, малоплотной застройки и высокоплотной застройки или леса.

Естественно, основой методики – ее центральным звеном – является метод CFD-моделирования вычислительной гидродинамики. Результаты моделирования обрабатываются при помощи методов математической статистики. А вводные данные для CFD-моделирования требуют применения методов построения цифровых моделей рельефа и застройки и полевых ветромерных измерений (для верификации компьютерной модели).

В физической основе модели UrbaWind лежат приближенные, численные решения уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, в трехмерном пространстве (3D RANS, Reynolds-averaged Navier-Stokes) [17]. В виде системы из двух уравнений их представляют так (1, 2) [17, с. 7]:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_i} = 0, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] + F_i = 0, \quad (2)$$

где – ρ плотность воздуха, г/м³; μ – динамическая вязкость воздуха, при давлении 100 кПа и температуре 0 °С это константа со значением 17.4 мкПа · с; \bar{u}_i , \bar{u}_j – средние составляющие показателя скорости ветра, м/с; \bar{u}'_i , \bar{u}'_j – турбулентные (флуктуационные) составляющие показателя скорости ветра, м/с; F_i – величина сопротивления пористой среды движению воздуха в объеме i -й ячейки, м/с (при наличии).

В UrbaWind используется модель турбулентности k - ϵ [18], описывающая турбулентные пульсации через взаимные изменения двух переменных характеристик потока: кинетическую энергию отдельных “струй” k и параметр интенсивности ее диссипации (рассеяния) ϵ . Это наиболее распространенный тип модели турбулентности, применяемый в инженерных аэродинамических расчетах на сегодня.

Форма вертикального профиля средней скорости ветра входного потока в пограничном слое атмосферы складывается в модели UrbaWind также из двух составляющих: 1) основной, изменяющейся “при равновесном состоянии атмосферы” [11, с. 20] по логарифмическому закону в зависимости от высоты; 2) величины функции Экмана, влияющей на поворот вектора скорости в горизонтальной плоскости (при ламинарном течении) как результат взаимного противодействия кориолисовых сил и турбулентного трения. Первая составляющая определяется согласно уравнению (3) [11]:

$$u_z = \frac{v_*}{\chi} \ln \frac{z}{z_0}, \quad (3)$$

где u_z – скорость ветра на высоте z , м/с; v^* – динамическая скорость (скорость трения), м/с; χ – постоянная Кармана, равная для случая атмосферного воздуха 0.4; z – высота, м; z_0 – шероховатость подстилающей поверхности, м.

Величина второй составляющей на высотах до нескольких десятков метров над земной поверхностью обычно пренебрежимо мала [11, с. 21].

Указанные уравнения решаются для случайных сочетаний ветровых характеристик в узлах нерегулярной сетки с заданной детальностью (ее среднее значение и параметр разброса), которая достигает максимальных значений (“сгущена”) у граней и узлов геометрических объектов в модели (например, у поверхности грунта или стен зданий) и минимальных – на удалении от них. Это позволяет гораздо эффективнее распределять вычислительные ресурсы для получения того же результата, какой мог бы быть получен на регулярной сетке. Такой подход – разбиение расчетной области на конечное число “объемов”, для центров которых и высчитываются пространственно-дискретные показатели искомой величины – в инженерных науках носит название “метода конечных элементов” [19].

Результаты и их обсуждение

Смоделированы аэрационные условия для двух участков в г. Курске (группа разноэтажных кварталов к северу от исторического центра г. Курска, включая фрагмент долины р. Кур; обособленная группа зданий 5–13 этажей в окружении малоэтажной застройки в квадрате улиц Перекальского, Дубровинского и Маяковского). В дальнейшем будем называть эти участки К1, К2 соответственно (рис. 1). При подборе участков мы руководствовались принципами: 1) обеспечения морфологического разнообразия рельефа; 2) разнообразия параметров застройки; 3) отличия их от параметров застройки окружения.

Участок К1 приурочен к долине р. Кур (а именно, ее днищу и склонам по обоим бортам), пологим склонам и вершинной поверхности междуречного увала р. Кур и р. Тускарь, у слияния которых и была в 1596 г. заложена Курская крепость. Линейные размеры участка – примерно 500×500 м. Амплитуда высот – более 70 м. Юго-западную четверть площади участка занимают собственно днище долины р. Кур и крутой циркообразный фрагмент ее склона с относительной высотой от днища до бровки местами до 40 м (рис. 1). Застройка постепенно сменяется от много- и среднеэтажной на плакоре до частной малоэтажной на склонах и в днище долины.

Участок К2 располагается на подсыпанном фрагменте поймы р. Тускарь и ранее принадлежал т. н. “Ямской слободе” г. Курска. Сейчас это квартал из 5-, 9- и 13-этажных жилых зданий разных периодов постройки; имеются 2- и 3-этажные корпуса детского сада и школы. Квартал вытянут приблизительно на 400 м с запада на восток и немногим меньше – с юга на север. Генеральное направление уклона поверхности на участке западное. Амплитуда высот не превышает 5 м.

Моделирование аэрации на каждом участке производилось для двух “обстановок рельефа” – субгоризонтальная идеальная поверхность и реальная поверхность. Моделирование осуществлялось для отметок 2 м над уровнем грунта, размер ячейки расчетной сетки принимался 0.1 м (рис. 2).

В результате моделирования получено по четыре массива чисел (по два на каждую из “обстановок рельефа” для двух участков) для каждого из восьми основных румбов. Эти массивы попарно сравнивались между собой, оценивалась значимость отличий ветровых характеристик в целом на участке, и сами отличия в каждой отдельной точке

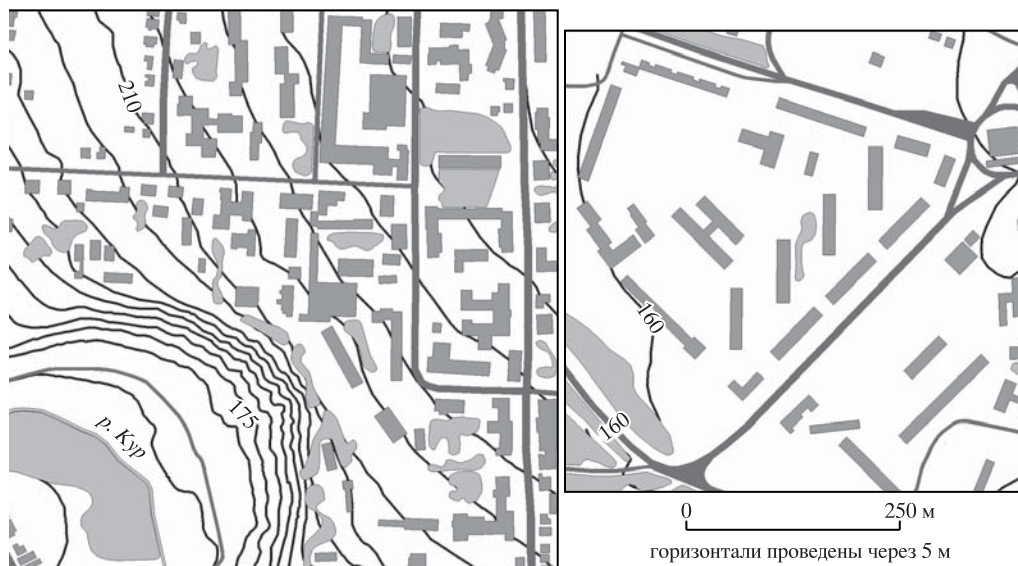


Рис. 1. Схемы участков К1 и К2

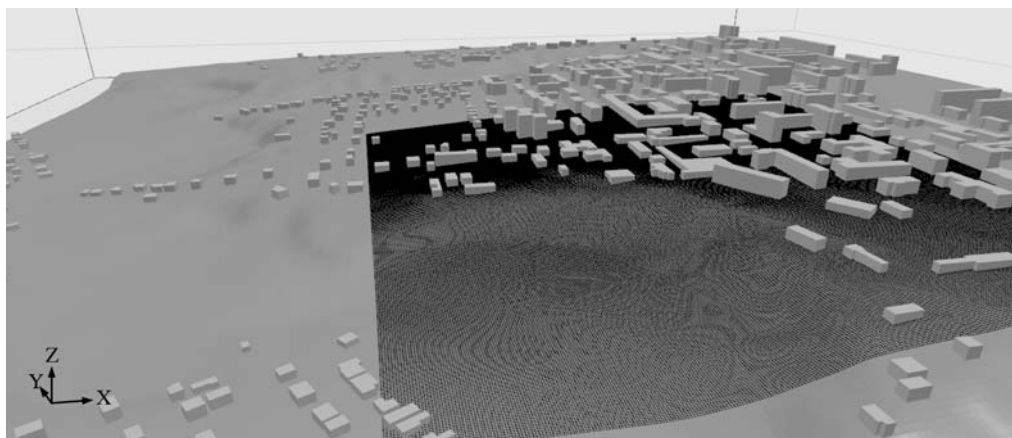


Рис. 2. Модель застройки участка K1, наложенная на цифровую модель рельефа, и покрытие расчетной сетки

расчетной сетки. Ареалы (в границах всего участка моделирования) с наибольшими отличиями ветровых характеристик обыкновенно приурочены к склонам, днищам полых форм рельефа. В таблице приведены значения средней скорости ветра на высоте 2 м над уровнем земной поверхности. За единицу принята скорость входного ветрового потока на высоте флюгера (10–12 м над уровнем земной поверхности).

Принимая во внимание характерные изменения скорости ветра с высотой, совершенно очевидно, что в подавляющем большинстве случаев (точек расчетной сетки на участке) коэффициенты средней скорости на высоте 2 м будут много меньше единицы. Выше уже сказано, что с увеличением высоты над земной поверхностью скорость ветра чаще всего возрастает по логарифмическому закону, а интенсивность этого роста в приземном слое зависит, прежде всего, от параметра шероховатости подстилающей поверхности. Однако степень гашения скорости ветра у земной поверхности будет различна при разных направлениях потока, т. к. находится в зависимости от морфологии рельефа по тому или иному направлению.

Сравнение медианных значений коэффициента средней скорости ветра на всем участке для условий плоской поверхности и условий реального рельефа позволяет оценить

Медианные значения коэффициентов средней скорости ветра относительно входной скорости на высоте флюгера и их стандартные отклонения для восьми основных румбов ветра для участков K1 и K2

Участок и тип модели		Коэффициенты изменения средней скорости ветра для высоты 2 м над уровнем земли, по направлениям, среднее \pm стандартное отклонение; коэффициенты R парной корреляции Пирсона							
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
K1	topo*	0.22 \pm .10	0.23 \pm .09	0.22 \pm .09	0.27 \pm .11	0.28 \pm .13	0.27 \pm .11	0.26 \pm .11	0.25 \pm .10
	flat**	0.35 \pm .13	0.36 \pm .15	0.28 \pm .11	0.41 \pm .17	0.40 \pm .15	0.39 \pm .15	0.38 \pm .16	0.40 \pm .16
	R (topo; flat)***	0.47	0.31	0.46	0.55	0.55	0.39	0.56	0.63
K2	topo	0.41 \pm .20	0.40 \pm .22	0.41 \pm .18	0.43 \pm .24	0.43 \pm .21	0.39 \pm .25	0.37 \pm .21	0.41 \pm .24
	flat	0.34 \pm .15	0.33 \pm .17	0.35 \pm .15	0.34 \pm .16	0.34 \pm .15	0.31 \pm .18	0.32 \pm .15	0.34 \pm .16
	R (topo; flat)	0.96	0.97	0.98	0.97	0.97	0.97	0.92	0.95

Примечание. * – результаты моделирования с учетом рельефа земной поверхности в модели; ** – результаты моделирования без учета рельефа земной поверхности в модели; *** – коэффициенты R парной корреляции Пирсона значений скорости ветра в моделях с учетом рельефа и без его учета.

влияние именно морфологии земной поверхности на ветровую обстановку для всего участка. В целом для того же пригоден показатель R парной корреляции Пирсона. Действительно, чем меньше соотносятся между собой значения в узлах расчетной сетки для расчета над плоской поверхностью и над ЦМР, имитирующей реальный рельеф, тем больше следует признать влияние рельефа на дистрибуцию ветровых потоков.

Наименьшими показателями корреляции для участка K1 характеризуются расчеты для двух взаимно противоположных направлений – СВ (0.31) и ЮЗ (0.39). Если взглянуть на схему участка K1, можно заметить, что это, во-первых, генеральное направление уклона поверхности для всего участка, а во-вторых, именно так ориентирован наиболее крутой фрагмент склона долины, и, без сомнения, именно он служит причиной столь низких показателей парной корреляции. И набегающий на вздымающийся склон ветровой поток ЮЗ направления, и “скатывающийся” с него поток СВ направления, образующий к тому же на склоне и в основании уступа мощную ветровую тень, – были бы совершенно нетипичны для этого участка, располагаясь он на субгоризонтальной площадке. При отклонении от этих двух направлений распределение скоростей ветра по территории все больше походит на аналогичное распределение, подсчитанное для субгоризонтальной площадки (растут коэффициенты корреляции).

На участке K2 с характерными показателями крутизны поверхности $0-1^\circ$ величины R коэффициентов корреляции Пирсона по всем основным румбам выше 0.9. Это ясно свидетельствует в пользу того, что на данном участке количественное выражение роли рельефа в формировании ветровой обстановки довольно близко к величинам случайных ошибок в модели. В целом, принимая во внимание явно меньшую барьерную роль самого рельефа участка, легко объяснить и более высокие медианные значения коэффициентов средней скорости ветра.

Таким образом, влияние рельефа на аэрацию кварталов городской застройки можно количественно выразить путем сравнения вычисленных параметров ветрового потока по разным направлениям (здесь параметр – коэффициент средней скорости ветра относительно его скорости на высоте флюгера, принятой за единицу) – для условий идеальной плоской поверхности и для реального рельефа. Это сравнение удобно проводить с использованием коэффициента R парной корреляции Пирсона для параметров ветра в соответствующих узлах расчетной сетки для двух “обстановок рельефа”. Чем меньше показатель R – тем в целом для участка больше барьерная роль рельефа. На территориях, взятых в качестве примеров, минимальные показатели R характерны для более расчлененной поверхности участка K2 и соответствуют, во-первых, генеральному направлению уклона всего участка, во-вторых, направлению уклона наиболее крутосклонной площадки – циркуобразного фрагмента эрозионного уступа долины р. Кур. Влияние субгоризонтальной поверхности на участке K2 довольно мало и находится, по-видимому, в пределах погрешности построения модели.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-05-31010мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kaplan H. and Dinar N.* Boundary Layer Structure. Modeling and Application to Air Pollution and Wind Energy. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1984. 482 p.
2. *Tieleman H.W.* Wind characteristics in the surface layer over heterogeneous terrain // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1992. Vol. 41. Iss. 1–3. P. 329–340.
3. *Petersen E.L., Mortensen N.G., Landberg L., Huijstrup J., and Frank H.P.* Wind power meteorology. Part I: Climate and turbulence // *Wind Energy*. 1998. Vol. 1. Iss. 1. P. 2–22.
4. *Jain P.* Wind energy engineering. New York: The McGraw-Hill, 2011. 352 p.
5. *Сениушенкова И.М.* Теория формирования и методы развития урболовандшафтов на овражно-балочном рельефе: Дис. ... докт. техн. наук. М.: МГСУ, 2011. 387 с.
6. *Большов С.И., Харченко С.В.* Городской рельеф как фактор комфортности проживания // *Экологическая геоморфология. Новые направления*. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2015. С. 59–78.
7. *Nicholson S.E.* A pollution model for street-level air // *Atmospheric Environment*. 1975. No. 9. P. 19–31.

8. Nunez M. and Oke T.R. The energy balance of an urban canyon // Journal of Applied Meteorology. 1977. No. 16. P. 11–19.
9. Колбин Д.С., Оленьков В.Д. Исследование ветрового режима с целью аэрации и ветрозащиты городских территорий // Вестн. ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2011. № 1. С. 36–39.
10. Максимова О.И., Саенко Н.А. Оценка влияния жилой застройки на аэрационный режим центральной части г. Братска // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 5. С. 41–43.
11. Серебровский Ф.Л. Аэрация жилой застройки. М.: Стройиздат, 1971. 112 с.
12. Alcoforado M.-J., Andrade H., Lopes A., and Vasconcelos J. Application of climatic guidelines to urban planning. The example of Lisbon (Portugal) // Landscape and urban planning. 2009. № 90. P. 56–65.
13. Brookes Ch. Local Climates of Worcester, Massachusetts, as a Factor in City Zoning // Bull. of American Meteorological Society. 1923. Vol. 4. P. 83–86.
14. Лихачёва Э.А., Тимофеев Д.А., Жидков М.П., Липец Ю.Г., Локишин Г.П., Маккавеев А.Н., Чеснокова И.В., Просунцева Н.С., Чичагов В.П., Курбатова Л.С., Некрасова Л.А., Горюцкий К.В., Переслгина Р.Е. Город-экосистема. М.: ИГРАН, 1996. 336 с.
15. Симонова Т.Ю. Эколого-геоморфологические исследования городских территорий // Экологическая геоморфология. Новые направления. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2015. С. 46–59.
16. Хайруллин К.Ш., Борисенков Е.П., Егорова А.Ю., Образцова М.З., Антонова Т.Л. Российский гидрометеорологический словарь. Т. 3. Р–Я / Под ред. А.И. Бедрицкого. СПб.–М.: Летний сад, 2009. 216 с.
17. Kalmikov A., Dupont G., Dykes K., and Chan C. Wind power resource assessment in complex urban environments: MIT campus case-study using CFD Analysis [Электронный ресурс] // AWEA 2010 WINDPOWER Conference May 23–26, 2010. Режим доступа: <http://people.csail.mit.edu/cychan/papers/awea10-ra.pdf>. Дата обращения: 10.10.2015.
18. Lauder B.E. and Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. Vol. 3. Iss. 2. P. 269–289.
19. Versteeg H. and Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Harlow: Pearson (Prentice Hall), 2007. 503 p.

Поступила в редакцию 13.01.2016

THE EXPERIENCE OF QUANTITATIVE ASSESSMENT OF RELIEF INFLUENCE ON THE URBAN BUILDING AERATION

S.V. KHARCHENKO

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia
e-mail: xar4enkkoff@rambler.ru

Summary

Buildings aerating features are one of important characteristics of urban environment. The CFD method (realized in the UrbaWind software) was used for quantitative assessment of relief (topographic) influence on the aeration of urban residential zones. The necessary stage of CFD-modeling is creating of geometrically correct image of real landscape. The model must include Earth surface, buildings and main groups of trees. Modeling need such input data as digital elevation model (DEM), digital buildings model and field anemometrical data (for verification of computer simulation results). Then these results analyzed by methods of mathematical statistics. The assessment of topography influence on the aeration of two residential areas was implemented: 1) for group of urban square with different number of storeys to north from historical center of Kursk including the part of Kur River's valley; 2) for one urban square on leveled surface of Tuskar' River's floodplain. The influence of topography on the aeration of residential sites is possible to define by comparison of wind field characteristics by different directions for two conditions: ideal flat topography and real topography. The comparison is convenient to realize by Pearson-correlation (*R*-coefficient) of pairs of mean speed values in the same points of model. On the whole, the minimal values of *R* are inherent to the more topographical dissected area (site №1). By some directions the minimal values of *R* are inherent 1) to general aspect of Earth surface on the site; 2) to aspect of the most sloped area – fragment of erosional scarp of Kur River valley in the shape of cirque. The morphology of Earth surface even in plain environment influences on the urban area aeration.

Keywords: urban area relief, aeration of residential zone, assessment, CFD-modeling.

doi:10.15356/0435-4281-2016-3-45-51